Journal of Thailand Concrete Association
วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

# THE EFFECT OF AUTO GLASS WASTE VOLUME ON SULFURIC ACID RESISTANCE OF GEOPOLYMER

## ผลของปริมาณเศษกระจกรถยนต์ที่มีต่อความทนทานต่อกรดซัลฟูริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

**ปุณรดา บัวใหญ่รักษา[1], จักรพงษ์ เหล่าอัน[1], อำพล วงศ์ษา[2]*, วันชัย สะตะ[3], ปริญญา จินดาประเสริฐ[4]**

[1] นักศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[3] ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[4] ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ ภาคีสมาชิก ราชบัณฑิตยสภา สนามเสือป่า เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

**ARTICLE INFO:**

*Received: 1 February 2023*
*Received Revised Form: 16 February 2023*
*Accepted: 1 March 2023*

**Corresponding Author,*
*Email address: ampowo@kku.ac.th*

**ABSTRACT :**

This research aims to study the acid-resistant property of geopolymer mortars containing auto glass waste. The river sand was replaced with auto glass waste at 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 and 100% by volume. The test result was also compared with cement mortars containing auto glass waste. The sulfuric acid resistances were collected at 7, 14, 28, 56, 84, and 120 days. The test results showed that the sulfuric acid resistance slightly decreased with an increase in glass waste contents. However, the geopolymer mortar with 100% glass waste still exhibited better sulfuric acid resistance than that of the standard Portland cement mortar. Auto glass waste could be applied in geopolymer mortar and concrete for the construction industry. The use of auto glass waste to produce geopolymer composite not only reduces Portland cement consumption but also reduces the environmental problems caused by waste glass.

**KEYWORDS :** Geopolymer, Mortar, Glass waste, Tempered glass, Acid resistance

**บทคัดย่อ :**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความทนทานต่อการกัดกร่อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสม โดยทำการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษกระจกรถยนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 โดยปริมาตร เปรียบเทียบกับคุณสมบัติของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสม ทำการศึกษาความทนทานต่อการกัด


©2013 J. of TCA All rights reserved

กร่อนของกรดที่อายุ 7 14 28 60 90 และ 120 วัน ผลการทดสอบพบว่าการใช้เศษกระจกรถยนต์แทนที่ทรายแม่น้ำส่งผลให้ความทนทานต่อการกัดกร่อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ลดลง แต่อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมร้อยละ 100 ยังคงมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์มาตรฐาน จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการนำเศษกระจกรถยนต์มาประยุกต์ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และคอนกรีตสำหรับอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์แล้วยังถือเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากเศษกระจกรถยนต์ได้อีกด้วย

**คำสำคัญ:** จีโอโพลิเมอร์, มอร์ต้าร์, เศษกระจก, กระจกเทมเปอร์, ความทนทานต่อกรด

## 1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเศษกระจกรถยนต์ถือเป็นอีกหนึ่งปัญหาที่กำลังส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม โดยเศษกระจกรถยนต์ที่แตกชำรุดเสียหายแล้วไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อได้มักถูกนำไปกำจัดโดยการกองทิ้งหรือฝังกลบ ซึ่งถือเป็นการกำจัดที่ไม่ยั่งยืนและอาจเกิดเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมทั่วโลกได้ในอนาคต กระจกรถยนต์ที่ใช้งานในปัจจุบันมักจะมีการติดฟิล์มกรองแสงและกระบวนการผลิตกระจกรถยนต์จะมีชั้นพลาสติกที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกระจก 2 แผ่นที่นำมายึดติดกันเสมอ ส่งผลให้การรีไซเคิลเศษกระจกรถยนต์หรือนำเศษกระจกรถยนต์กลับมาใช้ใหม่เป็นไปได้ยากมากขึ้น เนื่องจากมีความจำเป็นที่ต้องแยกฟิล์มกรองแสงและพลาสติกชั้นกลางออกก่อน จึงทำให้การนำเศษกระจกรถยนต์กลับมาใช้ประโยชน์ยังมีไม่มากนักเมื่อเทียบกับปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นในแต่ละวัน การศึกษาการนำเศษกระจกรถยนต์มาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนวัสดุจากธรรมชาติในการผลิตวัสดุก่อสร้างจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการลดปริมาณเศษกระจกรถยนต์ที่กำลังเกิดขึ้นในอนาคตข้างหน้า

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่กลุ่มนักวิชาการและนักวิจัยกำลังให้ความสนใจในการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติเพื่อนำมาใช้งานทดแทนปูนซีเมนต์ในอนาคต เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน จีโอโพลิเมอร์ได้จากการนำวัสดุที่มีออกไซด์ธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลักมาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงแล้วกระตุ้นด้วยความร้อน จะทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ [1] นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์ยังมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น กำลังในช่วงอายุต้นสูง นำความร้อนต่ำ ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดี เป็นต้น งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเศษกระจกรถยนต์สามารถนำมาแทนที่ทรายแม่น้ำในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ [2] และซีเมนต์มอร์ต้าร์ [3] ได้ทำให้มอร์ต้าร์มีการนำความร้อนลดต่ำลง เป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีคุณสมบัติทางด้านกำลังที่ดีขึ้นหลังผ่านการสัมผัสความร้อนที่อุณภูมิสูง อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นมวลรวม

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสม โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษกระจกรถยนต์ในปริมาณร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 โดยปริมาตร ทำการทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่อายุ 7 14 28 60 90 และ 120 วัน ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำและเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมด้วย งานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการศึกษาความทนทานของการใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมในมอร์ต้าร์และคอนกรีต ซึ่งการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมนี้นอกจากจะสามารถลดการใช้งานปูนซีเมนต์ได้แล้ว ยังสามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการกำจัดโดยการกองทิ้งเศษกระจกรถยนต์ได้อีกด้วย

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

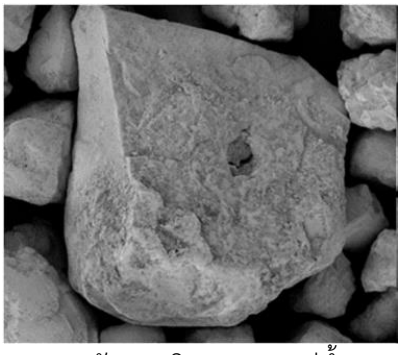
เศษกระจกรถยนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเศษกระจกรถยนต์นิรภัยประเภทเทมเปอร์ที่แตกแล้วนำมาบดและคัดขนาดให้มีขนาดคละใกล้เคียงกันกับทรายแม่น้ำดังรูปที่ 1 และ 2 โดย


©2013 J. of TCA All rights reserved

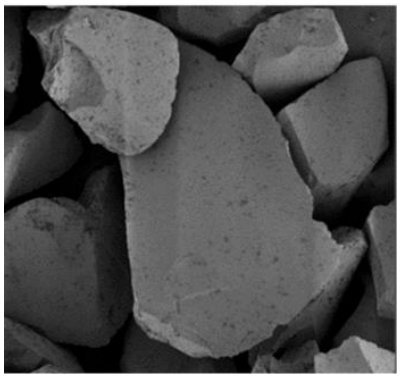
ทรายแม่น้ำจะมีลักษณะผิวขรุขระและอนุภาคโค้งมนที่เกิดจากการพัดพาไปตามกระแสน้ำหรือกระแสลม ในขณะที่เศษกระจกรถยนต์จะผิวที่เรียบและอนุภาคมีความเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่า เนื่องจากเป็นเศษกระจกรถยนต์ที่ผ่านกระบวนการบดให้มีขนาดเล็กลงใกล้เคียงกับทรายแม่น้ำ จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าเศษกระจกรถยนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่าทรายแม่น้ำ ในขณะที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกรถยนต์และทรายแม่น้ำมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากผ่านการคัดให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าทรายแม่น้ำมีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่าเศษกระจกรถยนต์แสดงให้เห็นว่าเศษกระจกรถยนต์มีความแน่นตัวและทึบน้ำมากกว่าทรายแม่น้ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2,3,4] พบว่าเศษกระจกรถยนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มี SiO2 Na2O และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก สำหรับเถ้าลอยมี SiO2 Al2O3 Fe2O3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 31.58 15.30 13.07 และ 27.10 ตามลำดับ ซึ่งมีแคลเซียมสูงกว่าร้อยละ 18 จึงจัดอยู่ในเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C168 - 19 [5] ในขณะที่ปูนซีเมนต์มี CaO และ SiO2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 70.54 และ 14.84 ตามลำดับดังตารางที่ 2

(ก) ทรายแม่น้ำ (ข) เศษกระจกรถยนต์

**รูปที่ 1** อนุภาคของทรายแม่น้ำและเศษกระจกรถยนต์หลังผ่านการบดและคัดขนาด



(ก) ลักษณะผิวของทรายแม่น้ำ



(ข) ลักษณะผิวของเศษกระจกรถยนต์

**รูปที่ 2** ลักษณะผิวของทรายแม่น้ำและเศษกระจกรถยนต์หลังผ่านการบดและคัดขนาด

**ตารางที่ 1** สมบัติของเศษกระจกรถยนต์ ทรายแม่น้ำ ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

| คุณสมบัติทางกายภาพ | เศษกระจกรถยนต์ | ทรายแม่น้ำ | ปูนซีเมนต์ | เถ้าลอย |
|---|---|---|---|---|
| โมดูลัสความละเอียด | 3.04 | 2.97 | - | - |
| หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.) | 1656 | 1713 | - | - |
| การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ) | 0.04 | 1.21 | - | - |
| ความถ่วงจำเพาะ (SSD) | 2.47 | 2.58 | 3.15 | 2.61 |
| ร้อยละค้างตะแกรงเบอร์ 325 | - | - | 5.9 | 25.3 |


©2013 J. of TCA All rights reserved

**ตารางที่ 2** องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์

| องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) | เถ้าลอย [2] | ปูนซีเมนต์ [3] |
|---|---|---|
| $SiO_2$ | 31.58 | 14.84 |
| CaO | 27.10 | 70.54 |
| $Al_2O_3$ | 15.30 | 3.31 |
| $Fe_2O_3$ | 13.07 | 3.47 |
| $SO_3$ | 3.55 | 3.38 |
| MgO | 3.22 | 1.01 |
| $Na_2O$ | 2.06 | 0.33 |
| $K_2O$ | 1.88 | 0.59 |
| $TiO_2$ | 0.34 | 0.28 |
| $P_2O_5$ | 0.33 | 0.08 |
| SrO | 0.11 | 0.04 |

**2.2 อัตราส่วนผสม**

จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์ควบคุมใช้อัตราส่วนทรายแม่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายเท่ากับ 0.58 และใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 ในขณะที่ซีเมนต์มอร์ต้าร์ควบคุมใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.485 เพื่อควบคุมค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 105 - 115 ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [6] ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษกระจกรถยนต์เท่ากับร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 โดยปริมาตรแสดงดังตารางที่ 3

**2.3 การเตรียมตัวอย่าง**

จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ทำการผสมโดยนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับเถ้าลอยให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมมวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำและเศษกระจกรถยนต์) แล้วผสมอีก 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตแล้วผสมต่ออีก 5 นาทีให้ส่วนผสมเข้ากัน เทตัวอย่างลงแบบหล่อ ทำการกระทุ้งและใช้โต๊ะเขย่า 10 วินาทีเพื่อไล่ฟองอากาศ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ก่อนนำไปบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างเย็นลง ทำการแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อแล้วห่อด้วยพลาสติกและนำไปบ่มต่อที่ห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นจนถึงอายุ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ

ซีเมนต์มอร์ต้าร์ทำการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305 [7] โดยนำปูนซีเมนต์และน้ำผสมในเครื่องผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมมวลรวมละเอียดแล้วผสมต่อเนื่องจนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วทำการเทตัวอย่างลงแบบหล่อ ทำการกระทุ้งและใช้โต๊ะเขย่า 10 วินาทีเพื่อไล่ฟองอากาศ หุ้มแบบหล่อด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยน้ำ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการแกะออกจากแบบหล่อ จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มต่อในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวจนถึงอายุ 28 วันก่อนนำไปทดสอบ

**ตารางที่ 3** อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์ (กรัม)

| ส่วนผสม | ทรายแม่น้ำ | เศษกระจกรถยนต์ | เถ้าลอย | สารละลายโซเดียมซิลิเกต | สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ | ปูนซีเมนต์ | น้ำ | ค่าการไหลแผ่ (ร้อยละ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0G | 2750 | 0 | 1000 | 290 | 290 | - | - | 112 |
| 20G | 2200 | 527 | 1000 | 290 | 290 | - | - | 118 |
| 40G | 1650 | 1043 | 1000 | 290 | 290 | - | - | 120 |
| 60G | 1100 | 1580 | 1000 | 290 | 290 | - | - | 121 |
| 80G | 550 | 2106 | 1000 | 290 | 290 | - | - | 118 |
| 100G | 0 | 2633 | 1000 | 290 | 290 | - | - | 115 |
| 0C | 2750 | 0 | - | - | - | 1000 | 485 | 110 |
| 100C | 0 | 2633 | - | - | - | 1000 | 485 | 115 |


©2013 J. of TCA All rights reserved

**2.4 การทดสอบ**

การทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C267 [8] ใช้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร โดยการแช่ในสารละลายซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ทำการชั่งน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่อายุ 7 14 28 60 90 และ 120 วัน ก่อนการชั่งน้ำหนักตัวอย่างต้องนำตัวอย่างมาล้างด้วยน้ำสะอาดและใช้แปรงขนอ่อนปัดผิวของตัวอย่างเบา ๆ เพื่อกำจัดส่วนที่ถูกกัดกร่อนออกก่อน จากนั้นซับน้ำที่ผิวของตัวอย่างแล้วทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง สำหรับสารละลายกรดซัลฟูริกที่ใช้แช่ตัวอย่างจะถูกเปลี่ยนใหม่ทุกครั้งหลังวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก และสำหรับการทดสอบจะใช้ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสมอย่างละ 3 ก้อนเพื่อหาค่าเฉลี่ย

**3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล**

**3.1 ผลของระยะเวลาในการแช่ตัวอย่างในกรดที่มีต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด**

ความทนทานต่อการกัดกร่อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมนอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษกระจกรถยนต์แล้วยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการแช่ตัวอย่างในกรดซัลฟูริกอีกด้วย จากตารางที่ 4 พบว่าเมื่อระยะเวลาของการแช่ตัวอย่างในกรดเพิ่มมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมจะมีร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียจากการกัดกร่อนของกรดจะเพิ่มมากขึ้น นั่นหมายถึงความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดจะลดลงตามระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างในกรด เมื่อพิจารณาจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้เศษกระจกรถยนต์ร้อยละ 100 เป็นส่วนผสมพบว่ามีร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจากการกัดกร่อนของกรดที่อายุ 7 14 28 60 90 และ 120 วันเท่ากับ 1.24 2.28 2.53 3.10 4.43 และ 6.95 ตามลำดับ สอดคล้องและเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นส่วนผสมซึ่งมีร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจากการกัดกร่อนของกรดที่อายุ 7 14 28 60 90 และ 120 วันเท่ากับ 0.92 1.39 1.46 1.63 1.92 และ 2.64 ตามลำดับ ในทุกครั้งหลังการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง สารละลายกรดซัลฟูริกจะถูกเปลี่ยนใหม่เสมอ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกจึงยังคงอยู่ตลอดเวลาของการทดสอบ ทำให้การกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกยังคงเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมา [3] ยังพบว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมร้อยละ 100 เป็นส่วนผสมมีร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจากการกัดกร่อนของกรดที่อายุ 7 14 28 60 90 และ 120 วันเท่ากับ 5.58 11.78 20.13 30.68 42.28 และ 53.43 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความทนทานของมอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมจะมีความทนทานลดลงตามระยะเวลาของการแช่ตัวอย่างในกรดซัลฟูริก

**3.2 ผลของปริมาณเศษกระจกรถยนต์ที่มีต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด**

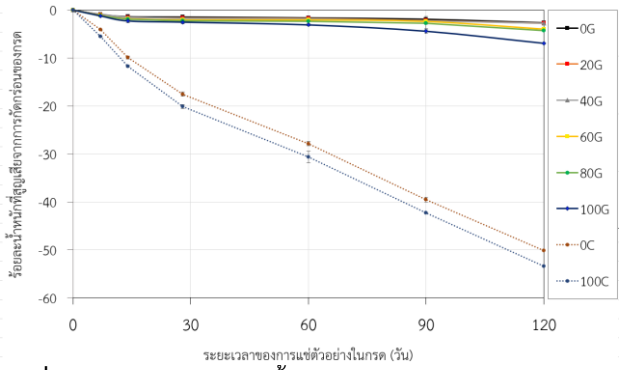
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เกิดจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกแสดงดังตารางที่ 4 จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณเศษกระจกรถยนต์ในส่วนผสมมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการแช่ตัวอย่างในกรดซัลฟูริก 120 วัน พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้เศษกระจกรถยนต์ร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 เป็นส่วนผสมจะมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.64 2.76 2.81 3.99 4.34 และ 6.95 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดลดลง สอดคล้องกับผลการทดสอบปริมาณโพรงของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4 ที่พบว่าการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษกระจกรถยนต์ส่งผลให้เกิดรูพรุนภายในตัวอย่างเพิ่มขึ้นในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ เนื่องจากเศษกระจกรถยนต์โดยทั่วไปจะมีผิวที่ค่อนข้างเรียบกว่าทรายแม่น้ำที่มีผิวขรุขระแสดงดังรูปที่ 2 ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเชื่อมประสานกับอนุภาคของเศษกระจกรถยนต์ลดลง ความแข็งแรงและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมจึงลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมา [2] ยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมมีความสามารถในการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรงมากขึ้นตามปริมาณของเศษกระจกรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้กรดซัลฟูริกสามารถแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกลดลง ผลการศึกษาในครั้งนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3] ซึ่งพบว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่ลดลงตามปริมาณการ


©2013 J. of TCA All rights reserved

แทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษกระจกรถยนต์ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมจะมีปริมาณโพรงที่สูงกว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ แต่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผสมเศษกระจกรถยนต์ยังคงมีความทนทานต่อการกัดกร่อนโดยกรดที่ดีกว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.3

**ตารางที่ 4** ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก

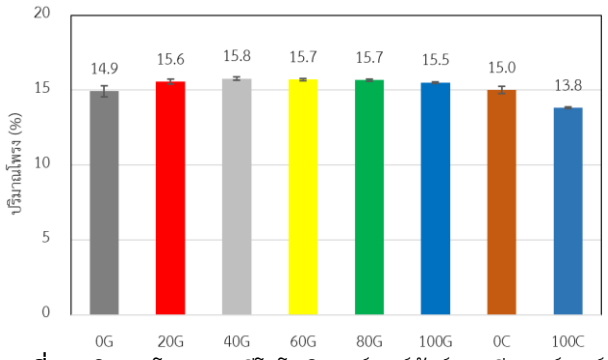
| | ระยะเวลาของการแช่ตัวอย่างในกรด (วัน) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ส่วนผสม | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
| 0G | -0.92 | -1.39 | -1.46 | -1.63 | -1.92 | -2.64 |
| 20G | -1.02 | -1.55 | -1.69 | -1.79 | -2.21 | -2.76 |
| 40G | -1.04 | -1.58 | -1.80 | -1.85 | -2.27 | -2.81 |
| 60G | -1.14 | -1.84 | -2.07 | -2.07 | -2.38 | -3.99 |
| 80G | -1.22 | -1.95 | -2.27 | -2.39 | -2.76 | -4.34 |
| 100G | -1.24 | -2.28 | -2.53 | -3.10 | -4.43 | -6.95 |
| 0C | -4.10 | -9.92 | -17.56 | -27.87 | -39.56 | -50.15 |
| 100C | -5.58 | -11.78 | -20.13 | -30.68 | -42.28 | -53.43 |




**รูปที่ 3** ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่เกิดจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก

### 3.3 ผลของชนิดวัสดุเชื่อมประสานที่มีต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด

เมื่อพิจารณาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนโดยกรดซัลฟูริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมตามรูปที่ 3 จะพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการกัดกร่อนของกรดน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำและเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมอย่างชัดเจน




**รูปที่ 4** ปริมาณโพรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์

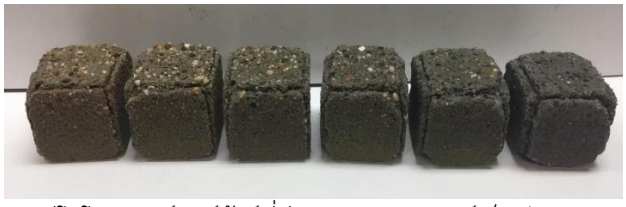
โดยทั่วไปการกัดกร่อนของซีเมนต์มอร์ต้าร์จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟูริกกับสารประกอบแคลเซียมซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)2) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบแคลเซียมที่ละลายน้ำได้คือ ยิปซัม (Gypsum, CaSO4) ซึ่งจะถูกชะล้างออกไปโดยน้ำ และแอตตริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งจะนำไปสู่การขยายตัวของซีเมนต์มอร์ต้าร์ส่งผลให้เกิดการหลุดร่อนและแตกร้าวของซีเมนต์มอร์ต้า [9,10] ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เป็นวัสดุอลูมิโนซิลิเกตที่ได้จากการนำวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกา (SiO2) และอลูมินา (Al2O3) เป็นองค์ประกอบหลักมาทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างความเข้มข้นสูง เกิดเป็นโครงสร้างโพลิเมอร์อลูมิโนซิลิเกตร่างแหที่เสถียรซึ่งยึดเกาะกันเป็นสายลูกโซ่ ดังนั้นในการกัดกร่อนของกรดนั้นจะเกิดขึ้นโดยการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างไอออนบวกของโครงสร้าง เช่น Na+ กับโปรตอนของสารละลายกรด (H+ และ H3O+) ทำให้อะลูมิเนียมหลุดออกจากเครือข่ายอลูมิโนซิลิเกต ในขณะที่ธาตุตัวอื่น เช่น Na ก็จะหลุดออกจากพันธะด้วยเช่นเดียวกัน โครงสร้างจึงมีความอ่อนแอลง [10,11] โดยความทนทานต่อการกัดกร่อนโดยกรดของระบบจีโอโพลิเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับการก่อตัวของเฟสผลึกภายในเครือข่ายอะลูมิโนซิลิเกต นั่นคือหากเฟสของผลึกเกิดได้มากขึ้นระบบจีโอโพลิเมอร์ก็จะมีความทนทานต่อกรดมากขึ้น และด้วยโครงสร้างโพลิเมอร์อลูมิโนซิลิเกตร่างแหของระบบจีโอโพลิเมอร์ที่มีความเสถียรมากกว่าโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำให้สารประกอบแคลเซียมดังกล่าวถูกกัดกร่อนโดยกรดได้ง่ายกว่า [12] ดังนั้นการที่ระบบจีโอโพลิเมอร์มีปริมาณของสารประกอบแคลเซียม (Ca) น้อยกว่าระบบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ถือว่าเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ระบบจีโอโพลิเมอร์มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดมากกว่าระบบ


©2013 J. of TCA All rights reserved

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ [11] สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [13,14] ที่ทำการศึกษาลักษณะความเสียหายจากการถูกกัดกร่อนโดยกรดซัลฟูริกของระบบจีโอโพลิเมอร์และระบบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และจากผลการทดสอบพบว่าระบบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เกิดความเสียหายจากการกัดกร่อนโดยกรดที่รุนแรงกว่าระบบจีโอโพลิเมอร์ ด้วยเหตุผลที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ แม้ว่าในการศึกษาครั้งนี้จะพบว่าการใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมแทนที่ทรายแม่น้ำจะทำให้ความทนทานต่อการกัดกร่อนลดลง แต่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์ร้อยละ 100 เป็นส่วนผสมยังคงมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดที่ดีกว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำ (0C) และเศษกระจกรถยนต์ (100C) เป็นส่วนผสม ความทนทานต่อการกัดกร่อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [15] ที่พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นส่วนผสมทดแทนทรายแม่น้ำมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่ดีกว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีมวลรวมธรรมชาติเป็นส่วนผสม

### 3.4 ลักษณะความเสียหายของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในกรดซัลฟูริกเป็นเวลา 120 วัน

รูปที่ 5 แสดงลักษณะความเสียหายของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ผ่านการแช่กรดซัลฟูริกเป็นเวลา 120 วัน จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมมีลักษณะความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดที่เหมือนกันกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีทรายแม่น้ำเป็นส่วนผสม ซึ่งเมื่อพิจารณาซีเมนต์มอร์ต้าร์จะพบว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมและซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีทรายแม่น้ำเป็นส่วนผสมมีลักษณะความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดที่ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกสำหรับระบบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะเกิดจากการที่กรดซัลฟูริกแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)2 และ CSH ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจำพวกแคลเซียมเกิดการสลายตัวกลายเป็นสารประกอบแคลเซียมที่ละลายน้ำได้และเอตตริงไกต์ที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการขยายตัว ส่งผลให้ผิวของซีเมนต์มอร์ต้าร์เกิดการหลุดร่อนและแตกร้าวออกมาเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาของการแช่ตัวอย่างเพิ่มขึ้นตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าร์จึงมีขนาดเล็กลง ในขณะที่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จะเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุของกรดซัลฟูริกที่แทรกซึมเข้าไปกับไอออนบวกในโครงสร้างเพื่อทำให้โครงสร้างเกิดความอ่อนแอ รวมถึงระบบจีโอโพลิเมอร์มีสารประกอบแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบน้อยกว่าระบบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จึงทำให้ลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นแค่บริเวณมุมและผิวของก้อนตัวอย่างซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนกับการหลุดร่อนของระบบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [13,16,17] ที่พบว่าตัวอย่างของทั้งสองระบบมีความเสียหายอย่างต่อเนื่องจากการแช่สารละลายกรดตามระยะเวลาการแช่ที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงลักษณะความเสียหายของระบบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ยังมีความรุนแรงมากกว่าระบบจีโอโพลิเมอร์อีกด้วย



(ก) จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100

(ข) ซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100

**รูปที่ 5** ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 หลังผ่านการแช่ในกรดซัลฟูริกเป็นเวลา 120 วัน

### 4. สรุป

จากการศึกษาความทนทานต่อการกัดกรอนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมพบว่า ความทนทานต่อการกัดกร่อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเศษกระจกรถยนต์เป็นส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณเศษกระจกรถยนต์ที่แทนที่ทรายแม่น้ำ ระยะเวลาของการแช่ตัวอย่างในกรด และชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน เมื่อปริมาณเศษกระจกรถยนต์ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และระยะเวลาของการแช่ตัวอย่างในกรดเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกจะลดลง แต่อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เศษกระจกรถยนต์แทนที่ทรายแม่น้ำร้อยละ 100 เป็นส่วนผสม


©2013 J. of TCA All rights reserved

จะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นส่วนผสม

**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**เอกสารอ้างอิง**

[1] J. Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications, 5th ed, 2020.

[2] P. Chindaprasirt et al., “Thermal insulating and fire resistance performances of geopolymer mortar containing auto glass waste as fine aggregate,” Journal of Building Engineering, vol. 60, p. 105178, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.105178.

[3] Y. Zaetang, J. Lao-Un, A. Wongkvanklom, A. Wongsa, V. Sata, and P. Chindaprasirt, “Fire-resistant and Thermal Insulation Improvements of Cement Mortar with Auto Glass Waste Sand,” KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 27, no. 9, pp. 4032–4042, Jul. 2023, doi: 10.1007/s12205-023-0442-0.

[4] จักรพงษ์ เหล่าอัน, อำพล วงศ์ษา, วันชัย สะตะ, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, “การใช้เศษกระจกรถยนต์เป็นมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์.” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 33, ฉบับที่ 3, กรกฎาคม - กันยายน, หน้า 47 - 57, 2565.

[5] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM C618 – 19, 2019.

[6] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM C109/C109M - 16a, 2016.

[7] Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM C305 - 20, 2020.

[8] Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacings and Polymer Concretes, ASTM C267-01, 2006.

[9] B. Anand, N. Sharma, and M. Ratnam, Monograph on durability of concrete. India, 2017.

[10] K. Chen, D. Wu, L. Xia, Q. Cai, and Z. Zhang, “Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments – A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement,” Construction and Building Materials, vol. 279, p. 122496, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122496.

[11] A. M. Izzat, H. Kamarudin, A. V. Sandu, M. Ruzaidi, T. M. Faheem, and L. M. Moga, “Sulfuric Acid Attack on Ordinary Portland Cement and Geopolymer Material,” Jan. 2013.

[12] L. S. Wong, “Durability Performance of Geopolymer Concrete: A review,” Polymers, vol. 14, no. 5, p. 868, Feb. 2022, doi: 10.3390/polym14050868. Available: https://doi.org/10.3390/polym14050868

[13] B. Pather, S. O. Ekolu, and H. Quainoo, “Effects of aggregate types on acid corrosion attack upon fly – Ash geopolymer and Portland cement concretes – Comparative study,” Construction and Building Materials, vol. 313, p. 125468, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125468.

[14] W. Zhao, Z. Fan, X. Li, L. Kong, and L. Zhang, “Characterization and Comparison of Corrosion Layer Microstructure between Cement Mortar and Alkali-Activated Fly Ash/Slag Mortar Exposed to Sulfuric Acid and Acetic Acid,” Materials, vol. 15, no. 4, p. 1527, Feb. 2022, doi: 10.3390/ma15041527.

[15] S. Naenudon et al., “High flexural strength lightweight fly ash geopolymer mortar containing waste fiber cement,” Case Studies in Construction Materials, vol. 16, p. e01121, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01121.

[16] K. Chen et al., “Resistance of blended alkali-activated fly ash-OPC mortar to mild-concentration


©2013 J. of TCA All rights reserved

sulfuric and acetic acid attack," Environmental Science and Pollution Research, vol. 29, no. 17, pp. 25694–25708, Nov. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-17555-7.

[17] W. Yang, P. Zhu, H. Liu, X. Wang, W. Ge, and M. Hua, "Resistance to Sulfuric Acid Corrosion of Geopolymer Concrete Based on Different Binding Materials and Alkali Concentrations," Materials, vol. 14, no. 23, p. 7109, Nov. 2021, doi: 10.3390/ma14237109.


©2013 J. of TCA All rights reserved

©2013 J. of TCA All rights reserved